

Revisiting the cold case of cold fusion

nature

Nature

27. Mai 2019

Curtis P. Berlinguette^{1,2,3,4*}, Yet-Ming Chiang⁵, Jeremy N. Munday^{6,7}, Thomas Schenkel⁸, David K. Fork⁹, Ross Koningstein⁹ & Matthew D. Trevithick⁹

¹ Department of Chemistry, University of British Columbia, Vancouver, British Columbia, Canada.

² Department of Chemical and Biological Engineering, University of British Columbia, Vancouver, British Columbia, Canada.

³ Stewart Blusson Quantum Matter Institute, University of British Columbia, Vancouver, British Columbia, Canada.

⁴ Canadian Institute for Advanced Research (CIFAR), Toronto, Ontario, Canada.

⁵ Department of Materials Science and Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA.

⁶ Department of Electrical and Computer Engineering, University of Maryland, College Park, MD, USA.

⁷ Institute for Research in Electronics and Applied Physics, University of Maryland, College Park, MD, USA.

⁸ Accelerator Technology and Applied Physics Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, USA.

⁹ Google LLC, Mountain View, CA, USA.

* e-mail: cberling@chem.ubc.ca; mdt@google.com

Zum englischsprachigen Onlineartikel



Die Wiederaufnahme des ungeklärten Falles der Kalten Fusion

Die im Jahr 1989 aufgestellte Behauptung einer „Kalten Fusion“ wurde der Öffentlichkeit als die Zukunft einer sauberen Energieerzeugung angepriesen. Nachfolgende Misserfolge bei der Reproduktion des Effekts haben die Skepsis gegenüber dieser Behauptung innerhalb der akademischen Gemeinde jedoch verstärkt und praktisch zu einer Disqualifikation des Themas im Hinblick auf weitere Studien geführt. Angetrieben von der Möglichkeit, dass ein solches Urteil voreilig ausgesprochen worden sein könnte, haben wir damit begonnen, die Kalte Fusion im Rahmen eines institutsübergreifenden Programms auf der Basis eines hohen Standards an wissenschaftlicher Präzision neu zu bewerten. Im Folgenden berichten wir über unsere Bemühungen, die bisher noch keine Beweise für einen solchen Effekt erbracht haben. Nichtsdestotrotz haben unsere Untersuchungen zu neuen Erkenntnissen über hochhydrierte Metalle und niederenergetische Kernreaktionen geführt. Wir sind der Meinung, dass es in diesem untererforschten Parameterraum noch eine Menge an interessanter Wissenschaft zu leisten gibt.

Am 23. März 1989 wurde eine außergewöhnliche wissenschaftliche Behauptung verkündet: Die Wärmeenergie, die bei der Elektrolyse von schwerem Wasser mit Hilfe einer Palladiumkathode erzeugt wurde, hat die Energie überstiegen, die auf den zugeführten Strom sowie auf alle anderen bekannten chemischen Prozesse zurückzuführen ist^[1]. Dieser möglicherweise neuartige nukleare Effekt wurde schließlich unter dem Namen „Kalte Fusion“ bekannt. Er bot die Aussicht auf saubere, reichlich verfügbare und preiswerte Energie und erregte daher weltweites Medieninteresse^{[2][3][4]}. Jedoch wurde

diese Entstehung anomaler Wärme sowie die von Kernfusionsprodukten während der Elektrolyse nicht angemessen validiert, und so wurden die Behauptungen von Seiten der wissenschaftlichen Gemeinde umgehend zurückgewiesen^{[5][6][7][8]}. Im November 1989 empfahl ein vom US-Energieministerium einberufenes Gremium, die Untersuchung von Phänomenen, die der Kalten Fusion zugeschrieben werden, nicht speziell zu unterstützen^[9]^[9]. Um es in der Sprache polizeilicher Verfahrensweisen auszudrücken: Der Fall wurde eingestellt.

Heutzutage haben viele Studenten und promovierte Wissenschaftler noch nie etwas von der Kalten Fusion gehört, und doch ruft der Begriff bei denjenigen, die die Ereignisse von 1989 miterlebt haben, immer noch starke Emotionen hervor. Von der Forschung des wissenschaftlichen Mainstreams bleibt das Thema weiterhin praktisch ausgeschlossen. Gleichwohl verstößt die Fusion von Leichtionen nicht gegen den Energieerhaltungssatz, so dass sich die Möglichkeit, solche Phänomene durch den geschickten Einsatz von Chemie und Materialwissenschaft erreichen zu können, nicht gänzlich ausschließen lässt (auch wenn die Wahrscheinlichkeit dafür sehr gering ist). Vor diesem Hintergrund ist ein kleiner Teil der wissenschaftlichen Gemeinde der Idee der Kalten Fusion gegenüber bis zu einem gewissen Grad aufgeschlossen geblieben. Einzelne Gruppen haben ihre Bemühungen fortgesetzt – ein glaubwürdiges „Referenzexperiment“, welches eindeutige Beweise für anomale Wärme oder für nukleare Reaktionsprodukte liefert und das unabhängig verifiziert und weiterentwickelt werden kann, konnte bislang jedoch noch erstellt werden.

Im Jahr 2015 haben wir uns zusammengetan, um herauszufinden, wie zuverlässige und zugängliche experimentelle Daten produziert werden können, mit denen die polarisierende Debatte über die Kalte Fusion, die nun schon seit drei Jahrzehnten schwelt, auf eine fundiertere Weise geführt werden kann^{[10][11][12][13][14][15][16]}. Unsere Initiative umfasste etwa 30 Doktoranden, promovierte Wissenschaftler und wissenschaftliche Mitarbeiter. Das Projekt wurde unter Einhaltung zweier Leitprinzipien umgesetzt: zum einen dem transparenten Zugang zu allen Forschern, Geräten und Daten und zum anderen einem strengen internen Peer-Review. Das Konzept, wonach die Hauptforscher als „Peergroup“ agieren, war integraler Bestandteil des Programms. Der Plan sah vor, ab dem Jahr 2016 zwei Jahre lang zu forschen, Forschungsgruppen in verschiedenen akademischen Laboratorien zusammenzustellen, die Interaktion zwischen den Gruppen zu fördern, sich zur Vermeidung von Ablenkungen unauffällig zu verhalten und unsere Ergebnisse letztendlich zu veröffentlichen. Ein wesentliches Ziel unseres Programms bestand darin, quantitative Grenzwerte für die Feststellung von anomalen thermischen oder nuklearen Effekten zu definieren. Für den Fall, dass glaubhafte Beweise für eine Anomalie gefunden würden, sollte die Vorrichtung zu einem Referenzexperiment weiterentwickelt werden, das vom Rest der Peergroup und schließlich von der breiteren wissenschaftlichen Gemeinde überprüft werden könnte. Mit dieser Veröffentlichung stellen wir unser Programm zum ersten Mal der Öffentlichkeit vor.

Bisher haben wir noch keine Beweise für jene anomalen Effekte gefunden, wie sie von den Befürwortern der Kalten Fusion behauptet werden, was sich auch auf prosaische Weise nicht erklären lässt. Unsere Arbeit beleuchtet hingegen die Schwierigkeiten bei der Schaffung jener Bedingungen, unter denen die Kalte Fusion der Hypothese nach zustande kommt. Dieses Ergebnis lässt die Möglichkeit offen, dass die Entlarvung der Kalten Fusion im Jahr 1989 vielleicht verfrüht war, da die entsprechenden physikalischen und materiellen Bedingungen noch gar nicht zuverlässig hergestellt und einer gründlichen Untersuchung unterzogen worden waren (und dies auch heute noch immer nicht sind). Sollte das Phänomen tatsächlich der Realität entsprechen (was wiederum eine offene Frage ist), könnte es gute technische Gründe dafür geben, dass die Befürworter der Kalten Fusion Schwierigkeiten damit haben, die anomalen Effekte zuverlässig und reproduzierbar nachzuweisen. Die anhaltende Skepsis gegenüber der Kalten Fusion hat durchaus ihre Berechtigung, aber wir sind der Meinung, dass zusätzliche Untersuchungen zu den relevanten Bedingungen erforderlich sind, bevor das Phänomen völlig ausgeschlossen werden kann.

Außerdem haben wir gelernt, dass die Untersuchung der Kalten Fusion auch Auswirkungen auf andere Bereiche von Wissenschaft und Technologie haben kann. Beispielsweise ist die Absorption von Wasserstoff in Palladium ein aktives Forschungsgebiet, auf dem untersucht wird, wie die Wechselwirkungen zwischen einem Metall und einer Lösung die Eigenschaften beeinflussen, die für die Speicherung von Energie, die Katalyse und die Sensorik relevant sind^{[17][18][19][20][21][22][23][24]}. Diese weitreichende Auswirkung unserer Arbeit resultiert unmittelbar aus der Notwendigkeit zur Entwicklung neuer Materialien und experimenteller Techniken, mit denen wir unser Verständnis von hochhydrierten Metallen und von den Niederenergetischen Kernreaktionen vorantreiben können^{[25][26]}.

Wir sind davon überzeugt, dass es innerhalb des Parameterraums von [Experimenten](#) zur Kalten Fusion spannende neue wissenschaftliche Erkenntnisse zu gewinnen gibt, und dass es sich hierbei um ein Gebiet handelt, das das Engagement der breiteren wissenschaftlichen Gemeinde verdient, selbst wenn sich die Entdeckung der Kalten Fusion mit ausreichend hohen Raten für energiewirtschaftliche Anwendungen nicht verwirklichen lässt.

Im Folgenden möchten wir auf die „Kalte Fusion“ zurück schauen, einen Überblick über unser Programm geben, unsere Ergebnisse im Hinblick auf die drei Hauptinitiativen des Programms betrachten – die hochhydrierten Metalle, die [Kalorimetrie](#) unter extremen Bedingungen und die Niederenergetischen Kernreaktionen – und mit einem kurzen Aufruf zum Handeln abschließen.

Ein historischer Überblick

Der Begriff der „Kalte Fusion“ wurde bereits 1956 verwendet, um die [myonenkatalysierte Fusion](#) zu beschreiben^{[27][28]}, doch mittlerweile ist die Bezeichnung untrennbar mit jenen elektrolytischen Experimenten verbunden, mit denen [Martin Fleischmann](#) und [Stanley Pons](#) im Jahre 1989 für Aufsehen sorgten^[1]. Ihre Experimente zielten darauf ab, die [Wärmemenge](#) zu messen, die bei Experimenten mit Elektrolyse[kathoden](#) aus [Palladium](#) (Pd) freigesetzt wird, wenn diese in [lithiumhaltiges schweres Wasser](#) eingetaucht werden (siehe Abbildung 1).

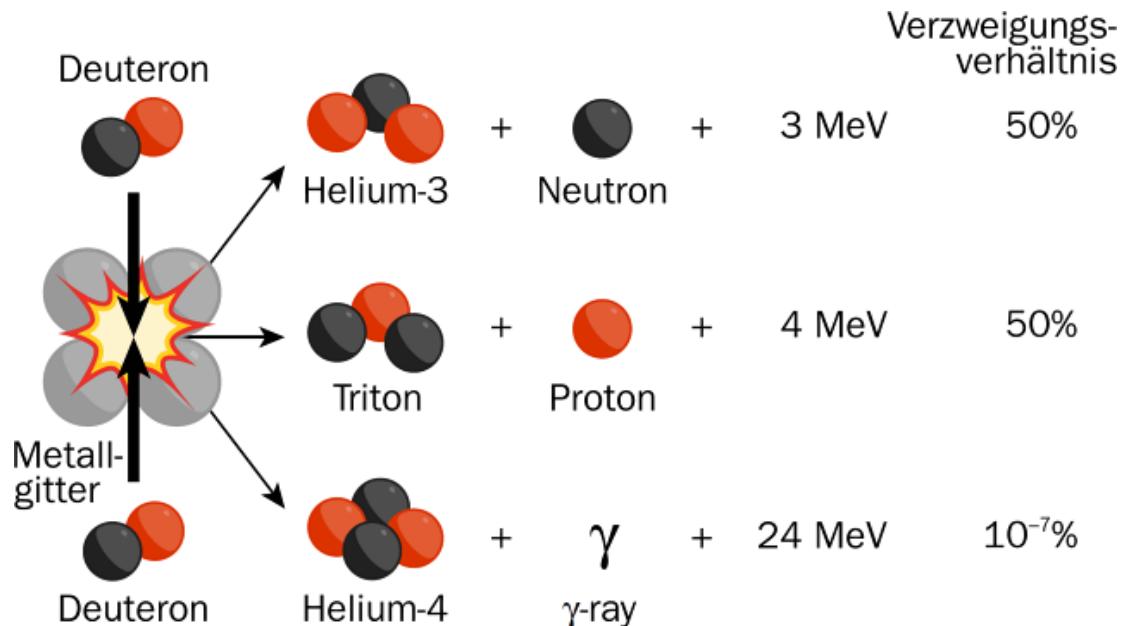


Abbildung 1 a | Wiederaufnahme der Kalten Fusion. Drei konventionelle Wege der Deuteron-Deuteron-Fusion (D-D) mit ihren jeweiligen Reaktionsprodukten, Energiefreisetzungsmengen und Verzweigungsverhältnissen^[29].

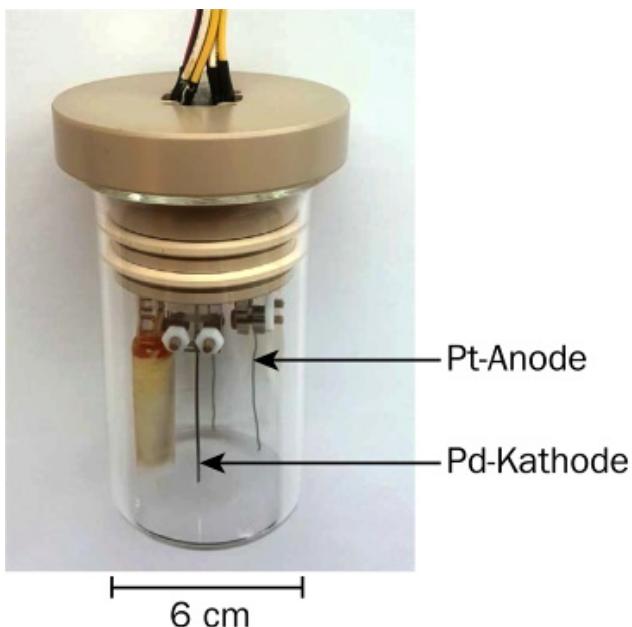


Abbildung 1 b | Wiederaufnahme der Kalten Fusion. Archetypische elektrochemische Zelle für die palladiumkatalysierte Elektrolyse von D₂O.

Um die Wärmebilanz der elektrochemischen Zelle als Funktion der [Stromdichte](#) und der [Elektroden](#)größe abzuleiten, griffen Fleischmann und Pons auf die [Enthalpie](#) der [D₂O](#)-Elektrolysereaktion zurück. Sie behaupteten, dass bei diesem Experiment mehr Wärme erzeugt worden sei, als durch die zugeführte [elektrische Energie](#) und alle bislang bekannten [chemischen Prozesse](#) erklärt werden könne. Der Umfang der festgestellten „Überschusswärme“ veranlasste Fleischmann und Pons sowie auch andere, dahinter einen nuklearen Mechanismus zu vermuten^{[1][30]}. Die [Detektion](#) von Neutronen in der Nähe des Experiments wurde dann als Bestätigung für die Vermutung präsentiert, wonach es sich hier um neuartige [Fusionsprozesse](#) handle.

Diese Ergebnisse stießen sofort auf Skepsis, denn [Atomkerne](#) sollten bei Raumtemperatur eigentlich nicht in der Lage sein, die [Coulombbarriere](#) in einer ausreichenden Häufigkeit zu durchdringen, als dass eine Fusion beobachtet werden könnte. Die Wahrscheinlichkeit einer Fusion sinkt exponentiell mit der Reduzierung der Teilchenenergie^{[29][31]}. Bei bekannten Fusionsprozessen mit Raten, die hoch genug sind, um in aktuellen Experimenten quantifiziert werden zu können, werden Teilchenenergien von mehr als etwa 2 keV im Massenmittelpunkt benötigt, was Temperaturen von mehr als 20 Millionen [Kelvin](#) entspricht. Allerdings bestehen bis zum heutigen Tag [Diskrepanzen](#) bei niedrigen Teilchenenergien (im Bereich von [Kiloelektronenvolt](#)) zwischen den [vorausberechneten](#) und den [beobachteten](#) Fusionsreaktionsraten. Zurückgeführt werden diese Diskrepanzen auf Effekte der [Elektronenabschirmung](#), die die Rate des [Tunnelns](#) durch die Coulombbarriere erhöhen^{[25][26][32][33][34][35][36]}.

Gemessen an den bekannten [Verzweigungsverhältnissen](#) für die [Deuteron-Deuteron-Fusion](#) (siehe Abbildung 1) wurden im Fleischmann-Pons-Experiment außerdem viel zu wenige [Neutronen](#) und [Tritonen](#) nachgewiesen, um die beobachtete Wärmemenge erklären zu können (ein Deuteron ist ein Deuteriumkern (D) und ein Triton ist ein Tritiumkern (T)). Von daher wurde vorgeschlagen, dass es sich bei $D + D \rightarrow {}^4\text{He} + 24 \text{ MeV}$ um den für die Kalte Fusion dominanten Reaktionsweg handelt, bei dem die gesamte Energie in Form von Wärme auf das [Wirtsmetallgitter](#) übergeht und als hauptsächliches nukleares Nebenprodukt [Helium](#) (das Isotop ${}^4\text{He}$) entsteht^[12]. Daneben wurden auch andere Mechanismen vorgeschlagen, die jedoch in der Regel die einfachen Versionen der [Impulserhaltung](#) verletzen, da es zu keiner nachweisbaren Strahlung kommt. Derzeit existiert keine allgemein anerkannte Theorie, die die Kalte Fusion erklären kann.

Bis jetzt haben die Bemühungen zur unabhängigen [Replikation](#) von Behauptungen über anomale Wärme und Fusionsreaktionsprodukte keine ausreichenden Beweise für die Existenz der Kalten Fusion erbracht. Im Jahr 2004 hat eine zweite Überprüfung durch das [US-Energieministerium](#) die Empfehlung ausgesprochen, die Forschung in zwei Bereichen zu verstärken, um so einige der [Kontroversen](#) auf

diesem Forschungsgebiet beizulegen: zum einen die [materialwissenschaftlichen](#) Aspekte deuterierter Metalle unter Verwendung moderner Charakterisierungsverfahren und zum anderen die Untersuchung von Teilchen, die angeblich von deuterierten Folien emittiert werden, unter Verwendung modernster Geräte und Methoden^[37]. Doch nur wenige akademische Laboratorien haben sich dieser Aufgabe angenommen. Unser Programm hat den Versuch unternommen, diese Situation zu überwinden.

Der Umfang des Programms

Seit 1989 ist eine Menge an Fachliteratur erschienen und ein umfangreiches Fachwissen über die Kalte Fusion entstanden ^{[1][15][30][38]} (siehe auch [lenr-canr.org](#)). Mangels einer allgemein anerkannten Theorie haben wir uns bei unserer Untersuchung des Themas auf die [empirische](#) Untersuchung von drei der prominentesten Behauptungen konzentriert: (1) die Behauptung, dass Metallelektroden, die mit außergewöhnlichen Mengen an Wasserstoff beladen sind, ein notwendiges Ausgangsmaterial für die Kalte Fusion bilden^[39]; (2) die Behauptung, dass Metallpulver, die in einer Wasserstoffumgebung erhitzt werden, Überschusswärme erzeugen^[40]; und (3) die Behauptung, dass durch gepulste Plasmaentladungen [Tritium](#) und andere anomale nukleare Signaturen erzeugt werden^[41]. Schnell wurde klar, dass diese Experimente eine sorgfältige Messung von Materialien unter extremen Bedingungen, einschließlich hoher Drücke, Temperaturen und [Potenziale](#), erfordern würden. Dazu müssten geeignete Messgeräte entworfen, hergestellt und [kalibriert](#) werden. Um die erforderlichen Geräte zu konstruieren und um eine statistisch signifikante Anzahl von Experimenten durchzuführen, würden nicht nur ein paar Monate, sondern einige Jahre nötig sein, und das selbst angesichts des begrenzten Umfangs unseres Programms. Und schließlich würden wir alle Experimente zu einem doppelten Zweck durchführen: zum einen zur Erweiterung des wissenschaftlichen Verständnisses der untersuchten Phänomene und zum anderen zur Bewertung der verschiedenen Behauptungen über die Kalte Fusion.

Hochhydrierte Metalle

Michael McKubre und Kollegen am [SRI International](#) (Kalifornien, USA) haben eine der größten Studien zur Kalten Fusion durchgeführt^[39]. In den frühen 1990er Jahren führten sie Dutzende von Elektrolyseexperimenten des Fleischmann-Pons-Typs durch und behaupteten, Überschusswärme erst dann beobachten zu können, wenn die Palladiumkathode mit Wasserstoff jenseits eines Schwellwertes von PdH_x beladen war, für den $x > 0,875$ gilt (siehe ^[39]). (Der Einfachheit halber steht „Wasserstoff“ in diesem Zusammenhang sowohl für [Wasserstoff](#) als auch für [Deuterium](#), für [Protonen](#), [Deuteronen](#) und [Hydrid](#).) Ungeachtet der anhaltenden Debatte innerhalb der Gemeinde der Kalten Fusion zu der Frage, ob eine hohe Beladung per se von Bedeutung ist oder ob diese zu wichtigen sekundären Phänomenen führt (wie z. B. zu strukturellen Defekten), haben wir beschlossen, dass das Verständnis darüber, wie hochhydrierte Metalle geschaffen, charakterisiert und aufrechterhalten werden können, in unserem Programm eine Priorität bildet.

Die meisten Experimente vom Fleischmann-Pons-Typ verwenden mit Deuterium beladene Palladiumkathoden. Daher haben wir uns zunächst auf das Materialsystem PdH_x konzentriert. [Palladium](#), eines der wenigen Elemente, die Wasserstoff sehr leicht absorbieren, bildet bei Raumtemperatur und 1 atm Wasserstoffdruck das PdH_x bei $x \approx 0,7$ ^[42]. Es stellt jedoch eine Herausforderung dar, die [Stöchiometrien](#) von PdH_x bei $x > 0,7$ zu bilden und zu charakterisieren (Abbildung 2)^{[43][44][45]}. Bei der [Absorption](#) von Wasserstoff durch Palladium treten nacheinander zwei verschiedene Phasen auf: eine α -Phase in [fester Lösung](#) bei niedrigeren Wasserstoffkonzentrationen und eine gitterexpandierte β -Phase bei höheren Wasserstoffkonzentrationen^[42]. In beiden Phasen besetzt der Wasserstoff im [kubisch-flächenzentrierten](#) [Kristallgitter](#) des Palladiums die [oktaedrischen](#) Gitterzwischenräume. In der β -Phase kann diese Stoffzusammensetzung zur Ausbildung einer Steinsalzstruktur mit einer Stöchiometrie von $\text{PdH}_{1,0}$ führen. Bei Raumtemperatur und Normaldruck ist die β -Phase jedoch auf eine Stöchiometrie von $\text{PdH}_{0,7}$ begrenzt (Abbildung 2)^[42]; eine weitere Aufnahme von Wasserstoff in das $\beta\text{-PdH}_x$ erfordert einen exponentiellen Anstieg des Wasserstoffdrucks.

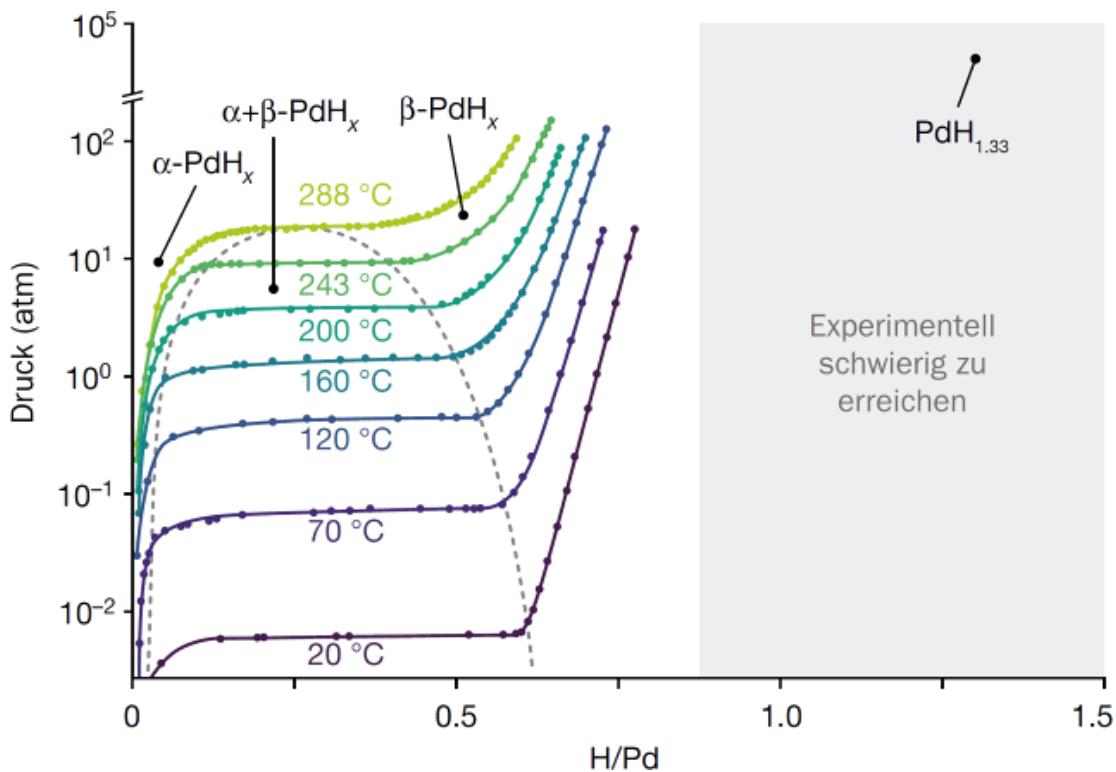


Abbildung 2 | Diagramm für Druck, Zusammensetzung und Temperatur des Palladiumhydrids mit den Phasen $\alpha\text{-PdH}_x$ und $\beta\text{-PdH}_x$. Unser Forschungsprogramm zielte darauf ab, das System des PdH_x mit $x > 0,875$ (grauer Bereich) zu erforschen, das bisher nicht ausreichend untersucht wurde, da seine Erzeugung und seine genaue Charakterisierung schwierig zu realisieren sind. $\text{PdH}_{1.33}$ (oben rechts im grauen Bereich) weist das höchste dokumentierte Verhältnis von Wasserstoff zu Palladium auf^[45]. Die Abbildung wurde mit Genehmigung von Springer aus^[42] abgeleitet.

Es gibt nur sehr wenige Studien, in denen überzeugende Beweise für eine Massenbeladung von PdH_x mit $x > 0,875$ erbracht werden (siehe^{[46][47][48][49]}), und noch weniger, in denen $x \geq 1$ ist (siehe^{[44][45][50]}). In dem Fall, in dem $x = 1,33$ beobachtet wurde, erfuhr das Gitter unter extremen Bedingungen (973 K und etwa 50 kbar an mechanischem Druck) eine Phasenänderung, die zur Bildung einer metastabilen überreichlichen Leerstellenphase führte, was durch eine In-situ-Röntgenbeugung gemessen wurde^[45].

Wir haben eine Reihe von Techniken in Betracht gezogen, um hochhydriertes Palladium herzustellen und dauerhaft nutzbar zu halten^{[44][45][51][52][53]}. Dabei hat sich die Elektrochemie als die Methode unserer Wahl herauskristallisiert, da ein Potenzial von moderater Höhe eine hohe Flüchtigkeit des Wasserstoffs bewirkt und dadurch eine hohe Wasserstoffbeladung ohne Hochdruckwasserstoff ermöglicht^{[54][55]}. Eine Überspannung von nur 120 mV ergibt das thermodynamische Äquivalent eines Drucks von etwa 100 atm^[56], allerdings erschweren konkurrierende Wasserstoffdesorptionsreaktionen noch immer das Erreichen außerordentlich hoher Wasserstoffbeladungsgrade. Die zahlreichen Typen von Palladiumelektroden, die von uns in wässrigen Medien getestet wurden, ergaben allesamt Werte von $x < 0,875$ in PdH_x (siehe^[57]), mit Ausnahme einer einzigen Probe, bei der $x = 0,96 \pm 0,02$ betrug (siehe^[53]). Es ist uns gelungen, reproduzierbar hohe Wasserstoffbeladungen in Palladium aufrechtzuerhalten ($x = 0,81 \pm 0,02$), indem wir eine speziell angefertigte elektrochemische Festkörperzelle einer bescheidenen elektrochemischen Antriebskraft von -1 V gegen die Reversible Wasserstoffelektrode (RHE) ausgesetzt haben^{[53][58]}. Dieses Zellendesign ermöglichte die Verwendung der Röntgenbeugung zur Messung der Beladungsgrade während des Gerätebetriebs durch die Nachverfolgung der Gitterausdehnung infolge der Wasserstoffabsorption^[58].

Auch die Charakterisierung der Wasserstoffkonzentrationen im Palladium stellt eine Herausforderung dar. Die Beladung von Palladiumelektroden mit interstitiellem Wasserstoff bewirkt eine Ausdehnung des Metallgitters, eine Änderung der elektrischen Impedanz und eine Zunahme der Masse. Wir fanden heraus, dass die In-situ-Röntgenbeugung^[58], die die Veränderungen der Gitterparameter misst, und die

Stripping-Coulometrie^{[59][60]}, die die während der Wasserstoffdesorption weitergegebene Ladung misst, die genauesten Methoden zur Charakterisierung der PdH_x -Stöchiometrie in elektrochemischen Umgebungen darstellen. Wir haben Fehler in zuvor angewandten Gitterexpansionskalibrierungen^[53] entdeckt und korrigiert, die andernfalls zu einer Überschätzung von x geführt hätten. Nach unserer Erfahrung stimmte die Vierleitermessung, die die elektrische Impedanz misst, um auf die PdH_x -Stöchiometrie zu schließen, nicht mit der Röntgenbeugung derselben Proben überein. Mechanische Spannungen und irreversible plastische Verformungen, welche durch die Gitterausdehnung verursacht werden, beeinflussen die Impedanz der Elektroden ganz unabhängig von der Wasserstoffbeladung. Und schließlich haben wir, um die Gasphasenbeladung von Wasserstoff in dünnen Metallfilmen zu verfolgen, eine Quarzkristall-Mikrowaage entwickelt, mit deren Hilfe die Massenzunahme bei der Absorption von Wasserstoffionen gemessen werden kann^[52]. Für eine präzise Messung der Wasserstoffbeladung mittels dieser Technik müssen zusätzliche Faktoren wie die spannungsinduzierte Filmkrümmung während der Gasabsorption berücksichtigt werden^[52].

Unsere Erfahrungen haben bestätigt, dass die werkstoffwissenschaftlichen Aspekte von deuterierten Metallen noch weiter erforscht werden sollten, so wie es auch das US-Energieministerium in seinem Bericht aus dem Jahr 2004 festgestellt hat^[37]. Wenn das Beladen von Metallen mit außergewöhnlich hohen Konzentrationen von Wasserstoff tatsächlich einen notwendigen Vorläufer für die Kalte Fusion darstellt, dann ist noch weitere Arbeit nötig, um stabile Proben von PdH_x mit $x \geq 0,875$ herzustellen und so diese Behauptungen umfassend zu bewerten. Wir sind auch weiterhin fasziniert davon, welche Eigenschaften sich aus PdH_x -Proben ergeben könnten, deren $x \geq 1$ ist.

Kalorimetrie unter extremen Bedingungen

Schon seit den frühen 1990er Jahren haben Forscher in Italien und anderswo darüber berichtet, dass die Kompositionen bestimmter metallischer Pulver zur Erzeugung von Überschusswärme führen, wenn diese unter Wasserstoffgas erhitzt werden^{[40][61]}. Um diese Behauptungen zu bewerten, müssen alle Möglichkeiten berücksichtigt werden, wie die Energie in einem Experiment, das bei hohen Temperaturen und unter einem hohen Druck durchgeführt wird, zufließen, abfließen oder gespeichert werden kann. So wurde es zu einer weiteren Priorität unseres Programms zu lernen, wie man die Kalorimetrie unter extremen Bedingungen durchführen kann.

Um diese Studien realisieren zu können, haben wir verschiedene Prototypen von Kalorimetern entwickelt. Diese Erfahrung hat uns mit vielen Arten des Versagens der Apparatur vertraut gemacht, von denen einige recht subtil sind und die durch die Hochtemperatur- und Hochdruckumgebung sowie durch die aggressiven Metall-, Alkali-, Wasserstoffproben, die für diese Experimente erforderlich sind, verursacht werden (Abbildung 3)^{[62][63]}.

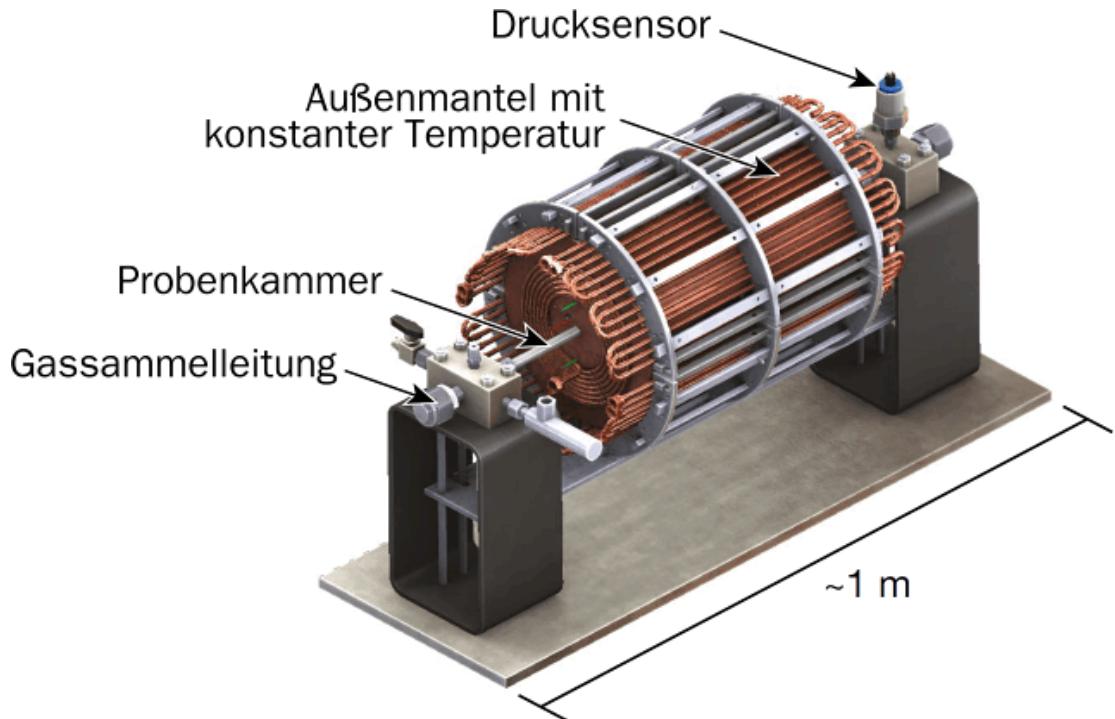


Abbildung 3 a | Das Erkennen von Überschusswärme bei hohen Temperaturen. Darstellung eines Kalorimeters, das in der Lage ist, die Erzeugung von Überschusswärme bei hohen Temperaturen und hohen Wasserstoffdrücken zu prüfen. Das Kalorimeter besteht aus einer zylindrischen Probenkammer aus Aluminiumoxid und aus 14 unabhängigen Thermoelementsensoren (nicht sichtbar), die sich in einem Außenmantel befinden, welcher eine konstante Temperatur aufweist. Die Enden der Probenkammer sind mit Gasverteilern verbunden, von denen einer mit einem Drucksensor ausgestattet ist.

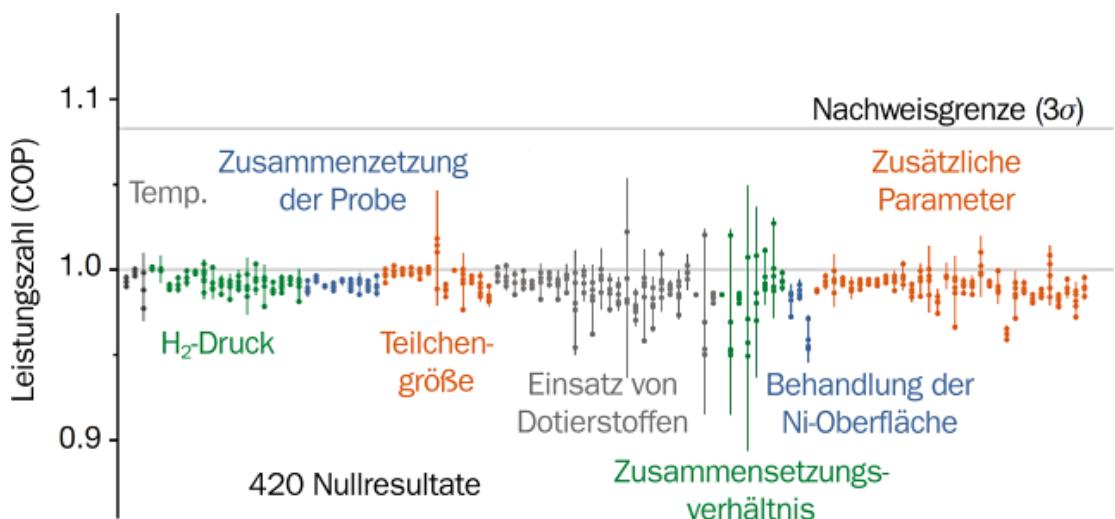


Abbildung 3 b | Das Erkennen von Überschusswärme bei hohen Temperaturen. Diagramm der Leistungszahl (COP) als Funktion der jeweiligen Messgröße (als farbiger Text dargestellt), um die Behauptung der Erzeugung von Überschusswärme durch das Ni-H-Materialsystem zu bewerten. Jede einzelne Messbedingung wurde standardmäßig auf vierfache Weise ausgeführt. Die 3 σ -Nachweisgrenze ist als durchgezogene graue horizontale Linie bei $COP = 1,0825$ dargestellt. Die Punkte stellen die 420 einzelnen Probelaufe dar, die vertikalen Linien die 95%-Konfidenzintervalle um den Mittelwert.

Entschieden haben wir uns für ein Kalorimeter, das bis zu einer Temperatur von 1200 °C und bei einem Druck von 33 atm sowie mit einer Messunsicherheit von weniger als 2 % zu arbeiten in der Lage ist^[63]. Unser Konstruktionsziel bestand darin, 10 % Überschusswärme mit einem hohen Maß an Sicherheit auflösen zu können. Genauer gesagt, wollten wir eine Leistungszahl (**COP**, definiert als das Verhältnis von Energie, die aus dem Kalorimeter heraus und in das Kalorimeter hineingeht) von > 1,09 mit einer statistischen Aussagekraft von 0,98 messen, was die Wiederholung jedes Experiments in vier identischen Kalorimetern unter Berücksichtigung der Prinzipien der Varianzanalyse erforderte. (Der Wert von 0,98 für die statistische Aussagekraft bedeutet hierbei, dass mit einer Wahrscheinlichkeit von 98 % ein Effekt korrekt identifiziert werden kann, vorausgesetzt, dass es einen solchen gibt.)

Im Laufe von 16 Monaten haben wir aktuelle Behauptungen von mehr als 10 % Wärmeüberschuss bei Proben von Nickelpulver und Lithiumaluminiumhydrid (LiAlH_4) ausgewertet. Wir überprüften die unabhängigen Variablen Temperatur, Druck, Probenzusammensetzung, Partikelgröße, Oberflächenbehandlung und weitere. Zur Verifizierung der Stabilität unserer Kalorimeter wurden vor und nach jedem Probendurchlauf Kontrollexperimente durchgeführt. Darüber hinaus entwickelten wir ein Rahmenwerk zur Systemidentifizierung^[64], um die Modellierung der zeitabhängigen Wärmeströme und Energiespeicherprozesse zu erleichtern, die für jedes Kalorimetrieexperiment spezifisch sind. Keine der 420 von uns ausgewerteten Proben lieferte jedoch Hinweise auf einen Wärmeüberschuss – die in unseren Experimenten gemessenen COPs waren durchweg einheitlich ($\pm 0,0825$ bei 3σ; siehe dazu P. A. Schauer und Mitautoren, Manuskript in Vorbereitung). Wir müssen einräumen, dass durch uns möglicherweise nicht alle experimentellen Bedingungen getestet wurden, die erforderlich sind, um den Wärmeüberschuss wie behauptet hervorzurufen. Und aus diesem Grund haben wir den Aufbau unserer Kalorimeter sowie unsere Analysewerkzeuge für diejenigen öffentlich zugänglich gemacht, die diesen Parameterraum weiter untersuchen möchten^{[63][64][65]}.

Durch unsere Studien wurde bestätigt, dass die Durchführung der Kalorimetrie unter extremen Bedingungen eine große Herausforderung darstellt, jedoch nicht unmöglich ist. Obwohl wir bisher keine überzeugenden Beweise für einen Wärmeüberschuss finden konnten, gibt uns unsere Erfahrung, die wir mit einer Reihe von Kalorimetriesystemen gemacht haben, die Zuversicht, dass wir ihn erkennen werden, sobald er auftritt.

Niederenergetische Kernreaktionen

Thomas Claytor und seine Kollegen vom Los Alamos National Laboratory (New Mexico, USA) haben Mitte der 1990er Jahre über die Erzeugung von Tritium im Rahmen von Experimenten mit niedriger Energie auf einem Labortisch berichtet^[41]. Sie verwendeten dazu eine gepulste Plasmaentladung in einer Umgebung aus Deuteriumgas, um auf diese Weise Deuteronen in eine Palladiumkathode zu treiben. Die Bewertung dieser Behauptung erfordert die Messung von Fusionsnebenprodukten (z. B. Neutronen, Protonen, Tritonen, ³He, ⁴He oder Gammastrahlen) als Funktion der Energie innerhalb eines anspruchsvollen Systems. Wir waren bestrebt, die nukleare Diagnostik in unser Programm einzubeziehen, da nukleare Signaturen, die sich über die Dauer des Experiments hinweg aufbauen und Einblick in die Reaktionsmechanismen geben, eine nützliche Ergänzung zur thermischen Analyse darstellen. Die Untersuchung des US-Energieministeriums aus dem Jahr 2004 hat auch die Analyse von Kernteilchen in den Experimenten zur Kalten Fusion empfohlen^[37].

Wir haben dazu eine Vorrichtung entwickelt, mit der wir Palladiumziele mit gepulsten Plasmen aus Deuteriumionen beschießen können, und die in der Lage ist, einen stärkeren Fluss zu erzeugen als jene Ionenstrahlen, die üblicherweise bei nuklearen astrophysikalischen Untersuchungen von Fusionsreaktionen bei niedrigen Energien verwendet werden^{[25][29][32][33][35][66][67]} (Abbildung 4).

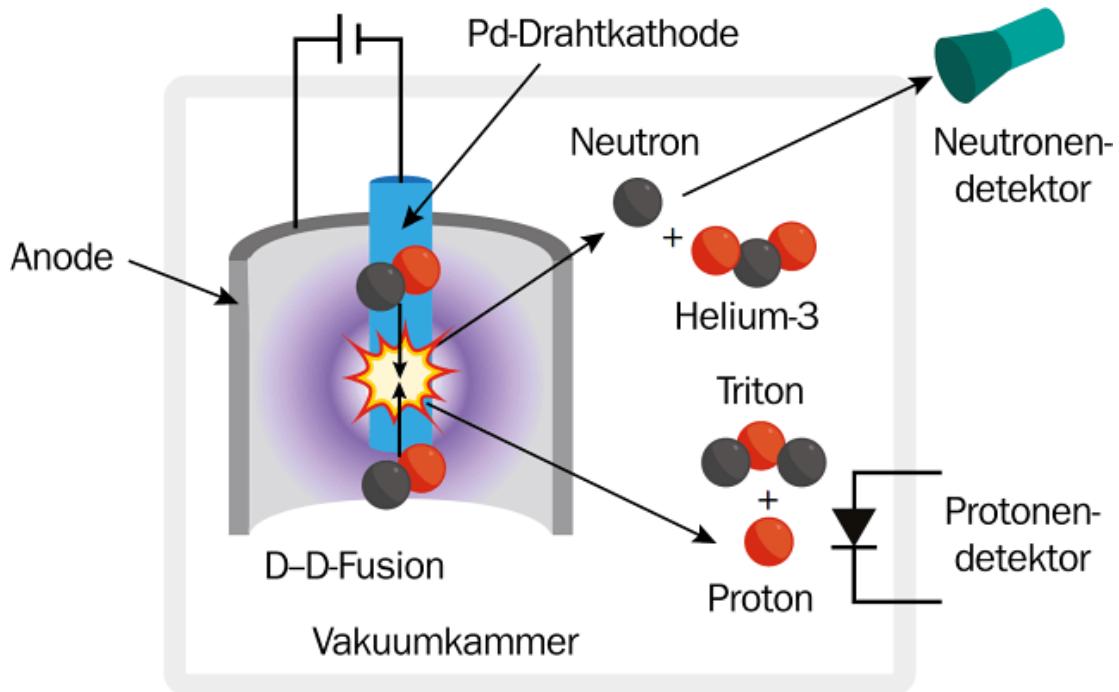


Abbildung 4 a | Vorrichtung für gepulstes Plasma. Schematische Darstellung des Experiments.

Unsere ersten Experimente^[68] bestanden aus einem Palladiumdraht ([Kathode](#)), der von einem Edelstahlkäfig ([Anode](#)) umgeben war, der sich wiederum in einer Vakuumkammer mit Deuteriumgas (D_2) bei etwa 1 [Torr](#) befand. Stromimpulse (Impulsdauer 20 μs , Wiederholrate 50 [Hz](#), Ionenstrom in der Spitze 1 [A](#)) ionisierten das D_2 und trieben D^+ -Ionen in den Palladiumdraht. Zur Detektion von [Neutronen](#) kamen externe 3He -basierte [Proportionalzähler](#) und [organische Szintillatoren](#) zum Einsatz, welche mit [Photomultipliern](#) gekoppelt waren. Der Nachweis von [Protonen](#) erfolgte mit Hilfe einer internen [Siliziumdiode](#).

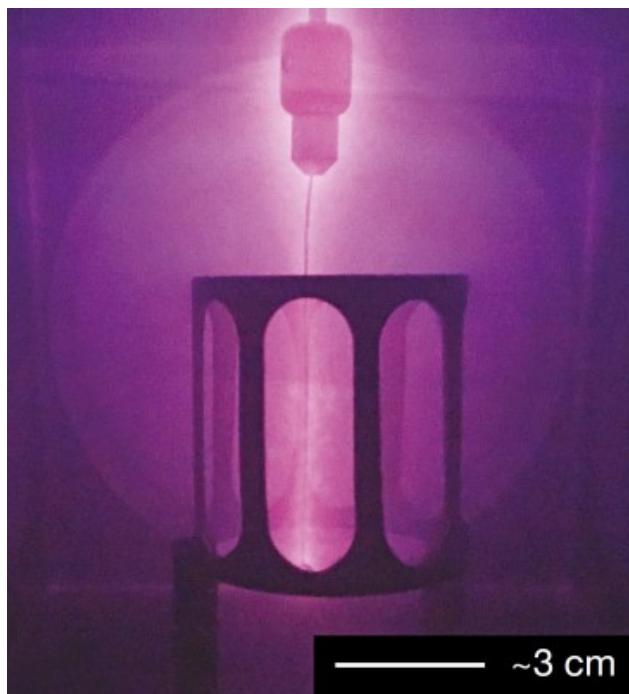


Abbildung 4 b | Vorrichtung für gepulstes Plasma. Aufnahme der [Elektroden](#) während des Experiments. Die Bedingungen, von denen behauptet wird, dass sie für eine Fusion erforderlich sind, werden durch die

Erzeugung eines gepulsten Plasmas aus Deuteriumionen zwischen dem Edelstahlkäfig und einem Ziel aus Palladiumdraht in einer mit Deuteriumgas gefüllten Vakuumkammer geschaffen^[68].

Frühe Ergebnisse dieser laufenden Studien haben bestätigt, dass wir bei Entladungsspannungen, die Ionenenergien von 1,2 kV im Massenmittelpunkt entsprechen, aus der D-D-Fusion Neutronen erzeugen und nachweisen können. Die Dosisleistung der Deuteriumionen liegt bei diesen Experimenten (1 A cm^{-2}) wesentlich über derjenigen bei Ionenstrahlexperimenten ($0,01\text{-}0,1 \text{ A cm}^{-2}$)^{[32][35][66][69]}. Ex-situ-Messungen der Ziele aus Palladiumdraht nach einer längeren Bestrahlung (Stunden bis Wochen, mit Gesamtfluenzen von etwa $10^{21} \text{ D}^+ \text{ cm}^{-2}$) unter Verwendung von Szintillationszählern haben bisher keine Hinweise auf eine gesteigerte Erzeugung von Tritium geliefert^[68].

Die Untersuchung der Fusionsphysik bei niedrigen Reaktionsenergien stellt eine Herausforderung dar, weil die Fusionsraten exponentiell mit der Energie abfallen und sich schnell unmessbar niedrigen Werten nähern (Siehe nachfolgende Textbox). Entsprechend weisen experimentelle Daten zu Fusionsreaktionen von Leichtionen bei niedrigen Energien große Fehlerbereiche auf, und Daten unter 2 keV im Bereich des Massenmittelpunkts liegen nur in sehr geringem Umfang vor^[70] (Abbildung 5).

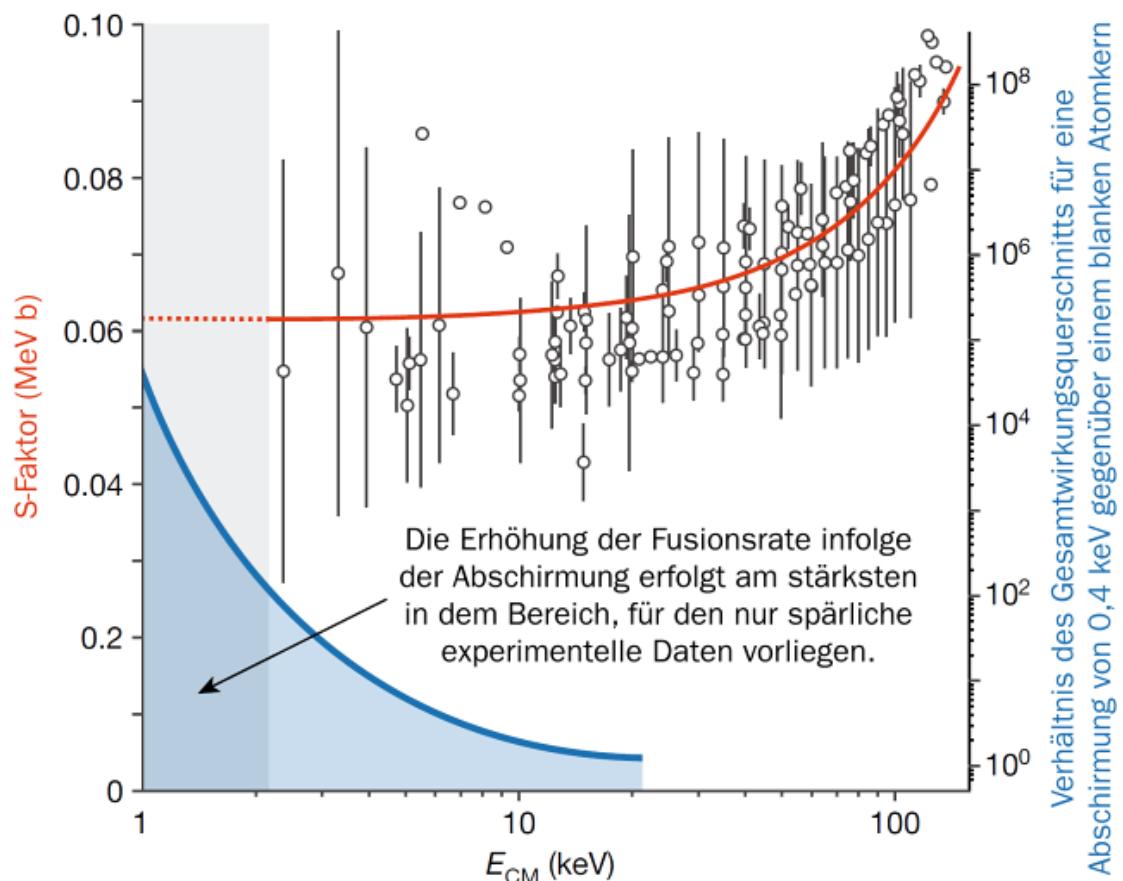


Abbildung 5 | Motivation zur Erforschung der Kernfusion bei niedrigeren Energien. Die Datenpunkte zeigen den astrophysikalischen S-Faktor für die D-D-Fusionsreaktion (linke vertikale Achse, rot) als Funktion der Energie des Massenmittelpunkts (E_{CM}). Die vertikalen Fehlerbalken enthalten sowohl statistische als auch geschätzte systematische Unsicherheiten, die auf anfängliche Brennstoffanteile und gemessene Temperaturen zurückzuführen sind. Die dicke rote Linie zeigt die beste Anpassung, die aus der Datenbibliothek ENDF/B-VII.1 extrahiert wurde^[71]. Der Wirkungsquerschnitt der Fusion σ_f und damit die Wahrscheinlichkeit für ein Fusionsereignis verhält sich proportional zum S-Faktor. Die dicke blaue Linie zeigt das Verhältnis des berechneten Wirkungsquerschnitts der Fusion für ein Abschirmungspotenzial von 0,4 keV (U_e) im Vergleich zu einem bloßen Kern

(rechte vertikale Achse, blau) als Funktion des ECM, wobei der schattierte blaue Bereich die Zunahme der Wahrscheinlichkeit für eine erhöhte Fusionsrate illustriert^[67]. Theoretische Vorhersagen deuten darauf hin, dass die Vergrößerung des Wirkungsquerschnitts durch die Elektronenabschirmung im schattierten grauen Bereich unterhalb von 2 keV im Massenmittelpunkt beträchtlich ist, wobei die Daten aus der Literatur bescheiden ausfallen und große Fehlerbereiche aufweisen. Die gepunktete rote Linie zeigt die lineare Extrapolation für die beste Anpassung. Die Abbildung wurde mit Genehmigung von Springer aus ^[70] abgeleitet.

Die nächste Phase unserer Plasmaentladungsexperimente wird auf den Erfahrungen aufbauen, die wir mit der Herstellung und der Charakterisierung von hochhydrierten Metallzielen gesammelt haben. Ziele mit genauer gesteuerten Materialeigenschaften eröffnen die Möglichkeit zur Durchführung genauer definierter Ionenstrahl^{[29][33][67]} und Plasmaexperimente bei niedrigeren Temperaturen. Uns begeistert die Möglichkeit, Daten zum Reaktionsquerschnitt und zum S-Faktor (Siehe nachfolgende Textbox) im grau schattierten Bereich von Abbildung 5 zu erhalten, mit denen die Grenzen der niederenergetischen Fusionsphysik erweitert werden könnten^{[29][33][66][69][70][72]}.

Niederenergetische Fusion

Fusionsreaktionen, die unter hohen Energien ablaufen, lassen sich ziemlich genau als die Kollisionen zwischen freien Ionen modellieren, welche sich über elektrostatische Wechselwirkungen gegenseitig abstoßen. Bei niedrigeren Energien, wenn die Energie der Ionen mit der Energie der Abschirmung zu vergleichen ist, gewinnt die Reduzierung der Höhe der Coulombbarriere an Bedeutung, da die Elektronen die elektrischen Felder der Ionen abschirmen^{[26][35][73]}. Durch die Anwendung von Abschirmungskorrekturen erhöht sich der Wirkungsquerschnitt σ_f und die Rate der niederenergetischen Fusion.

Ein unvollständiges, aber anschauliches Modell, das die Wahrscheinlichkeit einer Fusionsreaktion als Funktion der Teilchenenergie E und der Abschirmungsenergie U_e beschreibt, kann wie folgt ausgedrückt werden^{[35][36]}:

$$\sigma_f(E, U_e) = \frac{1}{\sqrt{E(E+U_e)}} e^{-\sqrt{E_g/(E+U_e)}} S(E)$$

Der Exponentialterm, der die Gamow-Energie E_g enthält, berücksichtigt die Wahrscheinlichkeit des Tunnelns durch die Coulombbarriere ($E_g = 2 m_r c^2 (\pi \alpha Z_1 Z_2)^2$), wobei m_r die reduzierte Masse der Teilchen 1 und 2, c die Lichtgeschwindigkeit, α die Feinstrukturkonstante und Z_1 und Z_2 die jeweiligen Ordnungszahlen der beiden Teilchen darstellen)^[29]. Der astrophysikalische S-Faktor $S(E)$ beschreibt die Wahrscheinlichkeit eines Fusionereignisses bei fehlender coulombscher Abstößung. Die Abschirmungsenergie U_e parametrisiert den Einfluss der Elektronenabschirmung auf den Zusammenstoß. Wichtig ist, dass eine Erhöhung dieser Abschirmungsenergie bei niedrigeren Energien die Wahrscheinlichkeit einer Fusionsreaktion erhöht (Abbildung 5).

Abschirmungsenergien für Fusionsreaktionen von Leichtionen liegen^{[35][36]} im Bereich von einigen Zehn bis zu einigen Hundert Elektronenvolt. Sie sind daher bei hohen Energien vernachlässigbar, erlangen aber unterhalb von 10 keV im Bereich des Massenmittelpunkts zunehmend an Bedeutung (Abbildung 5). Berichte darüber, dass die Abschirmung das Durchdringen der Coulombbarriere durch Ionen um viele Größenordnungen verstärken kann, verleihen der Abschirmung in unserem Streben nach der Fusion bei niedrigen Energien eine enorme Relevanz ^{[25][26][33][35][74][75][76]}. Die Feststellung, dass Myonen, die den Elektronen ähnlich, aber 207 mal so massereich sind, in der Lage sind, Wasserstoffkerne dichter aneinander heranzuführen, als diese es normalerweise wären, verstärkt die Ansicht, dass eine Abschirmung niederenergetische Kernreaktionen zu katalysieren vermag^[77]. Die höchsten

bekannten Abschirmungsenergien für eine Wasserstofffusion wurden bisher von hochhydrierten Metallen berichtet, in denen die Elektronen als auch die Wasserstoffkerne eine sehr hohe Dichte aufweisen^{[32][35][68][76]}. Durch Verfahren, die die lokale elektromagnetische Umgebung modulieren (z. B. die Anregung von Oberflächenplasmonen), lassen sich in Systemen mit kondensierter Materie möglicherweise weitere Verstärkungen der Abschirmungseffekte erzielen.

In der stellaren Fusion, bei der sich die relevanten Kollisionen im Energiebereich von etwa 1 bis 2 keV ereignen, spielt die Abschirmung eine entscheidende Rolle^{[29][78]}. Die Fusionsraten in stellaren Umgebungen lassen sich durch die Elektronenabschirmung^{[26][75]} sowie durch Kernresonanzen in angeregten Zuständen^{[29][35][79]} stark erhöhen. In jüngster Zeit sind experimentelle Kampagnen zur Untersuchung von Kernreaktionen im Energiebereich von Sternen (d. h. <2 keV im Bereich des Massenmittelpunkts) möglich geworden, bei denen Hochtemperaturplasmen in großen Laseranlagen zum Einsatz kommen^[70]. Bei den weiter verbreiteten Techniken kommen kalte Gas- oder Festkörperziele zum Einsatz, die mit Ionenstrahlen beschossen werden^{[29][33][69]}. Die höheren Dichten von Festkörperzielen machen diese repräsentativer für stellare Plasmen^[80], doch bringen Festkörperziele zwei grundlegende Herausforderungen mit sich: Zum einen werden die Ziele im Zuge des Experiments strukturell verändert, und zum anderen ist die Hydriddichte im Ziel schwer zu steuern und zu bestimmen^[68]. Diese Herausforderungen ähneln in bemerkenswerter Weise denen, auf die wir bei der Untersuchung von hochhydriertem Palladium gestoßen sind. Und wir sind davon überzeugt, dass die von uns entwickelten Verfahren auch für diese Untersuchungen von großem Nutzen sein können.

Aufruf zum Handeln

Die Kernfusion zeichnet sich als ein Mechanismus mit enormem Potenzial aus, die Art und Weise zu beeinflussen, wie wir Energie erzeugen. Das hat bereits eine internationale Investition in Höhe von 25 Milliarden Dollar für den Bau von ITER ausgelöst^{[81][82]}. Die gleichzeitige Erforschung alternativer Formen der Fusion, einschließlich der Kalten Fusion, könnte zu Lösungen führen, die kürzere Entwicklungszeiten aufweisen oder eine weniger umfangreiche Infrastruktur erfordern.

Eine berechtigte Kritik an unseren Bemühungen könnte lauten: „Warum die Kalte Fusion verfolgen, wenn ihre Existenz noch gar nicht bewiesen ist?“. Eine Antwort darauf ist, dass die Untersuchung der Kalten Fusion unser Programm dazu gebracht hat, Materialien und Phänomene zu untersuchen, die von uns sonst vielleicht nicht in Betracht gezogen worden wären. Wir haben uns auf die Suche nach der Kalten Fusion gemacht und stattdessen auf ganz unerwartete Weise von aktuellen Forschungsthemen profitiert^{[52][53][57][58][62][63][64][68][83][84][85]}.

Eine direktere Antwort auf diese Frage und die zugrundeliegende Motivation unserer Bemühungen besteht darin, in unserer Gesellschaft den dringend benötigten Durchbruch hin zu einer sauberen Energie zu schaffen^[86]. Um Durchbrüche zu finden, müssen Risiken eingegangen werden, und wir sind der Meinung, dass die Wiederaufnahme der Kalten Fusion ein Risiko darstellt, das es wert ist, eingegangen zu werden.

Wir hoffen, dass unsere Reise andere dazu inspirieren wird, Daten in diesem faszinierenden Parameterraum zu produzieren und beizutragen. Dies ist kein Unterfangen, bei dem es um alles oder nichts geht. Selbst wenn wir keine transformative Energiequelle finden, wird diese Erforschung der Materie fernab von einem Gleichgewicht wahrscheinlich einen wesentlichen Einfluss auf zukünftige Energietechnologien haben^{[87][88]}. Unserer Ansicht nach bleibt die Suche nach einem Referenzexperiment für die Kalte Fusion ein lohnenswertes Unterfangen, denn das Streben nach dem Verständnis und der Beherrschung ungewöhnlicher Zustände der Materie ist sowohl interessant als auch bedeutsam^{[87][88]}.

Referenzen

1. Fleischmann, M. & Pons, S. Electrochemically induced nuclear fusion of deuterium. *J. Electroanal. Chem. Interfacial Electrochem.* **261**, 301-308 (1989).

Artikel, der die Möglichkeit der Fusion bei Raumtemperatur im Zuge der Elektrolyse mit einer Palladiumkathode in einer LiOD/D₂O-Elektrolytlösung vorstellte, öffentlich bekannt gegeben auf einer Pressekonferenz an der Universität von Utah am 23. März 1989.

2. Cookson, C. Scientists claim nuclear fusion produced in test tube. *Financial Times* 1 (23 March 1989).
3. Bishop, J. Breakthrough in fusion may be announced. *Wall Street J.* B1 (23 March 1989).
4. Browne, M. W. Fusion in a jar: chemists' claim ignites an uproar. *New York Times* 1 (28 March 1989).
5. Miskelly, G. M. et al. Analysis of the published calorimetric evidence for electrochemical fusion of deuterium in palladium. *Science* **246**, 793-796 (1989).
6. Albagli, D. et al. Measurement and analysis of neutron and gamma-ray emission rates, other fusion products, and power in electrochemical cells having Pd cathodes. *J. Fusion Energy* **9**, 133-148 (1990).
7. Williams, D. E. et al. Upper bounds on 'cold fusion' in electrolytic cells. *Nature* **342**, 375-384 (1989).
8. Maddox, J. Farewell (not fond) to cold fusion. *Nature* **344**, 365-366 (1990).
9. USDOE Office of Energy Research, Energy Research Advisory Board. *Cold Fusion Research*. Report DOE/S-0073 doi.org/10.2172/5144772 (USDOE, 1989).
10. Mullins, J. Cold fusion back from the dead. *IEEE Spectrum* **41**, 22-23 (2004).
11. Ritter, S. K. Cold fusion died 25 years ago, but the research lives on. *Chem. Eng. News* **94**, 34-39 (2016).
12. Krivit, S. B. & Marwan, J. A new look at low-energy nuclear reaction research. *J. Environ. Monit.* **11**, 1731-1746 (2009).
13. Sanderson, K. Cold fusion is back at the American Chemical Society. *Nature* doi.org/10.1038/news070326-12 (2007).
14. Goodstein, D. Whatever happened to cold fusion? *Account. Res.* **8**, 59-75 (2000).
15. Krivit, S. B. in *Low-Energy Nuclear Reactions Sourcebook* Vol. 998 (eds Marwan, J. & Krivit, S. B.) 3-16 (American Chemical Society, 2008).
16. Brumfiel, G. US review rekindles cold fusion debate. *Nature* nature.com/news/2004/041129/full/news041129-11.html (2004).
17. Mohtadi, R. & Orimo, S.-I. The renaissance of hydrides as energy materials. *Nat. Rev. Mater.* **2**, 16091 (2016).
18. Montoya, J. H. et al. Materials for solar fuels and chemicals. *Nat. Mater.* **16**, 70-81 (2016).
19. Seh, Z. W. et al. Combining theory and experiment in electrocatalysis: insights into materials design. *Science* **355**, eaad4998 (2017).
20. Stamenkovic, V. R., Strmcnik, D., Lopes, P. P. & Markovic, N. M. Energy and fuels from electrochemical interfaces. *Nat. Mater.* **16**, 57-69 (2016).
21. Teschner, D. et al. The roles of subsurface carbon and hydrogen in palladiumcatalyzed alkyne hydrogenation. *Science* **320**, 86-89 (2008).
22. Liu, N., Tang, M. L., Hentschel, M., Giessen, H. & Alivisatos, A. P. Nanoantennaenhanced gas sensing in a single tailored nanofocus. *Nat. Mater.* **10**, 631-636 (2011).
23. Li, G. et al. Hydrogen storage in Pd nanocrystals covered with a metal-organic framework. *Nat. Mater.* **13**, 802-806 (2014).
24. Li, G. et al. Shape-dependent hydrogen-storage properties in Pd nanocrystals: which does hydrogen prefer, octahedron (111) or cube (100)? *J. Am. Chem. Soc.* **136**, 10222-10225 (2014).
25. Huke, A. et al. Enhancement of deuteron-fusion reactions in metals and experimental implications. *Phys. Rev. C* **78**, 015803 (2008).
26. Assenbaum, H. J., Langanke, K. & Rolfs, C. Effects of electron screening on low-energy fusion cross sections. *Z. Phys. A* **327**, 461-468 (1987).
27. Laurence, W. L. Cold fusion of hydrogen atoms; a fourth method pulling together. *New York Times* E7 (30 December 1956).
28. Rafelski, J. & Jones, S. E. Cold nuclear fusion. *Sci. Am.* **257**, 84-89 (1987).
29. Rolfs, C. E. & Rodney, W. S. *Cauldrons in the Cosmos: Nuclear Astrophysics* (Univ. Chicago Press, 1988).
30. Jones, S. E. et al. Observation of cold nuclear fusion in condensed matter. *Nature* **338**, 737-740 (1989).
31. Miley, G. H., Towner, H. & Ivich, N. *Fusion Cross Sections and Reactivities* (Illinois Univ., 1974).
32. Raiola, F. et al. Enhanced electron screening in d(d,p)t for deuterated metals. *Eur. Phys. J. A* **19**, 283-287 (2004).

33. Bertulani, C. A. & Kajino, T. Frontiers in nuclear astrophysics. *Prog. Part. Nucl. Phys.* **89**, 56-100 (2016).
34. Spitaleri, C., Bertulani, C. A., Fortunato, L. & Vitturi, A. The electron screening puzzle and nuclear clustering. *Phys. Lett. B* **755**, 275-278 (2016).
35. Czerski, K. et al. Screening and resonance enhancements of the $^2\text{H}(\text{d}, \text{p})^3\text{H}$ reaction yield in metallic environments. *Europhys. Lett.* **113**, 22001 (2016).
36. Coraddu, M., Lissia, M. & Quarati, P. Anomalous enhancements of low-energy fusion rates in plasmas: the role of ion momentum distributions and inhomogeneous screening. *Cent. Eur. J. Phys.* **7**, 527-533 (2009).
37. US Department of Energy. *Report of the Review of Low Energy Nuclear Reactions* (USDOE, 2004). **Bericht über eine Überprüfung, die 2004 vom US-Energieministerium durchgeführt wurde, um der Frage des wissenschaftlichen Nachweises für Niederenergetische Kernreaktionen nachzugehen.**
38. Packham, N. J. C., Wolf, K. L., Wass, J. C., Kainthla, R. C. & Bockris, J. O. Production of tritium from D₂O electrolysis at a palladium cathode. *J. Electroanal. Chem. Interfacial Electrochem.* **270**, 451-458 (1989).
39. McKubre, M. C. H. Cold fusion: comments on the state of scientific proof. *Curr. Sci.* **108**, 495-498 (2015). **Diskussion der ersten Experimente, die zur Bewertung der Fleischmann-Pons-Behauptung durchgeführt wurden.**
40. Focardi, S., Habel, R. & Piantelli, F. Anomalous heat production in Ni-H systems. *Nuovo Cim. A* **107**, 163-167 (1994).
41. Claytor, T. N., Jackson, D. D. & Tuggle, D. G. *Tritium Production from a Low Voltage Deuterium Discharge on Palladium and Other Metals.* doi.org/10.2172/102234 (LANL, 1995). **Methode zur Plasmabeladung, bei der angeblich eine unerwartete Menge an Tritium aus Palladiumdrähten erzeugt wird.**
42. Wicke, E., Brodowsky, H. & Züchner, H. in *Hydrogen in Metals II* (eds Alefeld, G. & Völki, J.) 73-155 (Springer, 1978).
43. Schirber, J. E. & Morosin, B. Lattice constants of $\beta\text{-PdH}_x$ and $\beta\text{-PdD}_x$ with x near 1.0. *Phys. Rev. B* **12**, 117-118 (1975).
44. Fukai, Y. & Ōkuma, N. Evidence of copious vacancy formation in Ni and Pd under a high hydrogen pressure. *Jpn. J. Appl. Phys.* **32**, L1256-L1259 (1993).
45. Fukai, Y. & Okuma, N. Formation of superabundant vacancies in Pd hydride under high hydrogen pressures. *Phys. Rev. Lett.* **73**, 1640-1643 (1994).
46. Skoskiewicz, T. Superconductivity in the palladium-hydrogen and palladiumnickel-hydrogen systems. *Phys. Status Solidi A* **11**, K123-K126 (1972).
47. Miller, R. J. & Satterthwaite, C. B. Electronic model for the reverse isotope effect in superconducting Pd-H(D). *Phys. Rev. Lett.* **34**, 144-148 (1975).
48. Harper, J. M. E. Effect of hydrogen concentration on superconductivity and clustering in palladium hydride. *Phys. Lett. A* **47**, 69-70 (1974).
49. Pröbst, F., Wagner, F. E. & Karger, M. Magnetic properties of solute 57Fe in β phase palladium hydride. *J. Less Common Met.* **88**, 201-209 (1982).
50. Möller, W., Besenbacher, F. & Bottiger, J. Saturation and isotope mixing during low-temperature implantations of hydrogen into metals. *Appl. Phys. A* **27**, 19-29 (1982).
51. Fukai, Y. et al. Superabundant vacancy-hydrogen clusters in electrodeposited Ni and Cu. *J. Alloys Compd.* **356-357**, 270-273 (2003).
52. Murray, J. B. et al. Apparatus for combined nanoscale gravimetric, stress, and thermal measurements. *Rev. Sci. Instrum.* **89**, 085106 (2018).
53. Benck, J. D., Jackson, A., Young, D., Rettenwander, D. & Chiang, Y.-M. Producing high concentrations of hydrogen in palladium via electrochemical insertion from aqueous and solid electrolytes. *Chem. Mater.* doi.org/10.1021/acs.chemmater.9b01243 (2019). **Elektrochemische Beladung von Palladiumelektroden mit Wasserstoff unter Verwendung von wässrigen, polymeren und keramischen Elektrolyten bei Raumtemperatur und Umgebungsdruck zur Erzeugung von PdH_x bis zu einem Wert von x = 0,96 ± 0,02.**
54. Felici, R., Bertalot, L., DeNinno, A., LaBarbera, A. & Violante, V. In situ measurement of the deuterium (hydrogen) charging of a palladium electrode during electrolysis by energy dispersive x-ray diffraction. *Rev. Sci. Instrum.* **66**, 3344-3348 (1995).
55. Knies, D. L. et al. In-situ synchrotron energy-dispersive X-ray diffraction study of thin Pd foils with Pd:D and Pd:H concentrations up to 1:1. *J. Appl. Phys.* **112**, 083510 (2012).

56. Maoka, T. & Enyo, M. Hydrogen absorption by palladium electrode polarized in sulfuric acid solution containing surface active substances - I. The cathodic region. *Electrochim. Acta* **26**, 607-614 (1981).
57. Sherbo, R. S. et al. Accurate coulometric quantification of hydrogen absorption in palladium nanoparticles and thin films. *Chem. Mater.* **30**, 3963-3970 (2018).
58. Benck, J. D., Rettenwander, D., Jackson, A., Young, D. & Chiang, Y.-M. Apparatus for operando X-ray diffraction of fuel electrodes in high temperature solid oxide electrochemical cells. *Rev. Sci. Instrum.* **90**, 023910 (2019).
59. Lawson, D. R. et al. Use of a coulometric assay technique to study the variables affecting deuterium loading levels within palladium electrodes. *Electrochim. Acta* **36**, 1515-1522 (1991).
60. Czerwiński, A. C., Kierszty, I., Grdeń, M. & Czapla, J. The study of hydrogen sorption in palladium limited volume electrodes (Pd-LVE) I. Acidic solutions. *J. Electroanal. Chem.* **471**, 190-195 (1999).
61. Levi, G. et al. Indication of anomalous heat energy production in a reactor device. Preprint at [arXiv.org/abs/1305.3913](https://arxiv.org/abs/1305.3913) (2013).
62. Young, D. et al. An operando calorimeter for high temperature electrochemical cells. Preprint at [arXiv.org/abs/1808.02596](https://arxiv.org/abs/1808.02596) (2018).
63. MacLeod, B. P. et al. High-temperature high-pressure calorimeter for studying gram-scale heterogeneous chemical reactions. *Rev. Sci. Instrum.* **88**, 084101 (2017).
64. MacLeod, B. P., Fork, D. K., Lam, B. & Berlinguette, C. P. Calorimetry under non-ideal conditions using system identification. *J. Therm. Anal. Calorim.* doi.org/10.1007/s10973-019-08271-z (2019).
65. Fork, D. K., MacLeod, B. P. & Parlante, F. G. L. Calorimetry System Identification (CSID). github.com/calorimetry/CSID (2017).
66. Broggini, C., Bemmerer, D., Caciolli, A. & Trezzi, D. LUNA: status and prospects. *Prog. Part. Nucl. Phys.* **98**, 55-84 (2018).
67. Kaczmarski, M. et al. New accelerator facility for measurements of nuclear reactions at energies below 1 keV. *Acta Phys. Pol. B* **45**, 509-518 (2014).
68. Schenkel, T. et al. Investigation of light ion fusion reactions with plasma discharges. Preprint at [arXiv.org/abs/1905.03400](https://arxiv.org/abs/1905.03400) (2019).
- In einem Plasmaentladungsexperiment, das zum Nachweis von Abschirmungseffekten bei der Leichtionenfusion entwickelt worden war, wurden D-D-Reaktionsausbeuten festgestellt, die etwa 100 mal höher lagen als für blanke Kerne zu erwarten ist.**
69. Best, A. et al. Underground nuclear astrophysics: why and how. *Eur. Phys. J. A* **52**, 72 (2016).
70. Casey, D. T. et al. Thermonuclear reactions probed at stellar-core conditions with laser-based inertial-confinement fusion. *Nat. Phys.* **13**, 1227-1231 (2017).
71. Chadwick, M. B. et al. ENDF/B-VII.0: next generation evaluated nuclear data library for nuclear science and technology. *Nucl. Data Sheets* **107**, 2931-3060 (2006).
72. Arcones, A. et al. White paper on nuclear astrophysics and low energy nuclear physics. Part 1: Nuclear astrophysics. *Prog. Part. Nucl. Phys.* **94**, 1-67 (2017).
73. Bosch, H. S. & Hale, G. M. Improved formulas for fusion cross-sections and thermal reactivities. *Nucl. Fusion* **32**, 611-631 (1992).
74. Caughlan, G. R. & Fowler, W. A. Thermonuclear reaction rates V. *Atom. Data Nucl. Data Tables* **40**, 283-334 (1988).
75. Salpeter, E. E. Electron screening and thermonuclear reactions. *Aust. J. Phys.* **7**, 373-388 (1954).
76. Kasagi, J. et al. Strongly enhanced DD fusion reaction in metals observed for keV D+ bombardment. *J. Phys. Soc. Jpn* **71**, 2881-2885 (2002).
77. Breunlich, W. H., Kammel, P., Cohen, J. S. & Leon, M. Muon-catalyzed fusion. *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* **39**, 311-356 (1989).
78. Williams, D. R. Sun fact sheet nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/sunfact.html (2018).
79. Tumino, A. et al. An increase in the $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ fusion rate from resonances at astrophysical energies. *Nature* **557**, 687-690 (2018); erratum **561**, E3 (2018).
80. Ichimaru, S. Nuclear fusion in dense plasmas. *Rev. Mod. Phys.* **65**, 255-299 (1993).
81. ITER Organization. *ITER Organization 2016 Annual Report*. iter.org/org/team/odg/comm/AnnualReports (ITER, 2017).
82. Fountain, H. A dream of clean energy at a very high price. *New York Times* D1 (27 March 2017).
83. Sherbo, R. S., Delima, R. S., Chiakowski, V. A., MacLeod, B. P. & Berlinguette, C. P. Complete electron economy by pairing electrolysis with hydrogenation. *Nature Catal.* **1**, 501-507 (2018).

84. Johnson, N. J. J. et al. Facets and vertices regulate hydrogen uptake and release in palladium nanocrystals. *Nat. Mater.* **18**, 434-458 (2019).
In-situ-Röntgenbeugungsexperimente zeigen, dass die Geschwindigkeit der Wasserstoffabsorption durch Palladiumnanokristalle mit der Anzahl der Eckpunkte zunimmt und die Geschwindigkeit der Wasserstoffdesorption bei 100 Facetten etwa zehnmal schneller ist als bei 111 Facetten.
85. Palm, K. J., Murray, J. B., Narayan, T. C. & Munday, J. N. Dynamic optical properties of metal hydrides. *ACS Photonics* **5**, 4677-4686 (2018).
Verwendung einer dehnungskompensierenden Mikrowaage zur in-situ-Bestimmung der Beladung mit gasförmigem Wasserstoff für verschiedene Palladium-, Magnesium-, Zirkonium-, Titan- und Vanadiumhydride.
86. Koningstein, R. & Fork, D. Energy's creative destruction. *IEEE Spectrum* **51**, 30-35 (2014).
87. Hemminger, J., Fleming, G. & Ratner, M. *Directing Matter and Energy: Five Challenges for Science and the Imagination*. doi.org/10.2172/935427 (USDOE Basic Energy Sciences Advisory Committee, 2007).
88. Hemminger, J. C., Sarrao, J., Crabtree, G., Flemming, G. & Ratner, M. *Challenges at the Frontiers of Matter and Energy: Transformative Opportunities for Discovery Science*. doi.org/10.2172/1283188 (USDOE Basic Energy Sciences Advisory Committee, 2015).
-

Abgerufen von „https://lenr.wiki/index.php?title=Revisiting_the_cold_case_of_cold_fusion&oldid=5474“

Diese Seite wurde zuletzt am 1. Oktober 2022 um 17:25 Uhr bearbeitet.